Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 19, No. 3, Fall. 2021, p. 275-285

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۹، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، ص. ۲۸۵-۲۷۵

مقاله پژوهشی

اثر رژیم‌های مختلف آبیاری بر تجمع برخی اسمولیت‌های سازگار و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاه کینوا

لایق مرادی[۱]، ابراهیم روحی[۲]، فرزاد حسین پناهی[۳*]، عادل سی‌وسه مرده[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴

چکیده

کمبود آب باعث ایجاد محدودیت شدید زیست‌محیطی جهت تولید گیاهان زراعی می‌شود. گیاه کینوا با توجه به توانایی رشد تحت شرایط نامساعد محیطی و ارزش غذایی بالای آن در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. این آزمایش به‌منظور بررسی تاثیر دور آبیاری و سطوح مختلف آبیاری روی کینوا در سال ۱۳۹۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه کردستان واقع در دشت دهگلان به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار اجرا شد. چهار دور مختلف آبیاری شامل ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ روز آبیاری به‌عنوان فاکتور اول و چهار سطح آبیاری شامل آبیاری کامل (۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه)، ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ نیاز آبی گیاه به‌عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از مطالعه نشان داد با کاهش آب در دسترس گیاه و افزایش فاصله دور آبیاری محتوای پرولین، گلیسین بتائین، کربوهیدرات‌های محلول و نامحلول و فعالیت آنزیم پراکسیداز و کاتالاز افزایش یافت اما عملکرد دانه کاهش یافت. افزایش فاصله دور آبیاری از ۴ به ۱۶ روز عملکرد دانه را ۴۴/۸۴٪ کاهش داد، همچنین عملکرد دانه گیاهانی که به میزان ۲۵٪ نیاز آبی، آبیاری شده بودند در مقایسه با شرایط شاهد ۵۶/۴۷٪ کاهش نشان داد.

واژه‌های کلیدی: پراکسیداز، پرولین، تنش خشکی، کاتالاز، گلیسین بتائین

مقدمه

کینوا با نام علمی *Chenopodiun quinoa* از زیر خانواده *Chenopodiaceae*، گیاهی است یکساله و منشا آن کوه‌های آند است و سابقه کشت آن به ۷۰۰۰ سال قبل برمی‌گردد (Geerts *et al.*, 2008). کینوا یک منبع غنی از پروتئین، آهن، روی، منیزیم، فیبر، فسفر، پتاسیم، منگنز، ویتامین B کمپلکس، ویتامین‌های E و C است. در لایه‌های بیرونی بذر کینوا ساپونین‌ها که گروهی از گلیکوزیدهای گیاهی و تلخ مزه هستند وجود دارند (Sinaha and Saxena, 2006). اهمیت غذایی کینوا مربوط به ترکیب کامل اسید آمینه، کلسیم، فسفر و آهن بالا و سدیم پایین است. با توجه به کیفیت غذایی بالای کینوا و توانایی رشد در شرایط انواع تنش همچون تنش خشکی و شوری، توجه جهانی را به خود جلب کرده است. کینوا به‌عنوان محصولی که به تازگی معرفی شده است می‌تواند در تامین نیاز غذایی جامعه و ایجاد امنیت غذایی نقش به‌سزایی ایفا کند (Repo-Carrasco *et al.*, 2003).

پدیده کمبود آب در نقاط مختلف دنیا بر پتانسیل تولید گیاهان اثرگذار است. تنش خشکی می‌تواند اثرات مخرب شدید در مراحل مختلف رشد و نمو گیاه داشته باشد (Song *et al.*, 2017). آب برای تمامی فرآیندهای مربوط به رشد و تولید گیاهان ضروری است بنابراین تمامی صفات مورفولوژیک و فیزیوبیوشیمیایی گیاهان تحت تاثیر تنش کمبود آب قرار می‌گیرد (Sadiq *et al.*, 2017). تنش خشکی در مناطق مختلف باعث ایجاد محدودیت در کشت محصولات کشاورزی می‌گردد. انتخاب و کشت گیاهان زراعی متحمل به تنش خشکی رویکردی مناسب جهت حفظ و یا افزایش تولید محصولات در مناطق تحت تنش کمبود آب می‌باشد (Jongrungklang *et al.*, 2013). گیاهان از طریق مکانیسم‌های مختلف مولکولی و فیزیوبیوشیمیایی همانند سیستم ریشه‌ای عمیق، ممانعت از هدر رفت آب از طریق تعرق، حفظ آماس سلولی، سنتز اسمولیت‌ها، تنظیم اسمزی و تنظیم روزنه‌ای باعث کاهش اثرات مخرب تنش کمبود آب

۱- دانشجوی دکترای تخصصی فیزیولوژی گیاهان زراعی گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان
۲- عضو هیئت علمی بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران
۳- استادیار فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان
۴- دانشیار فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان
(*- نویسنده مسئول: Email: f.hosseinpanahi@uok.ac.ir)
DOI: 10.22067/jcesc.2021.68443.1014

مـی‌شـوند (Aziz *et al*., 2018). اسـتراتژی سـازگاری گیاهـان بـه خشکی به چند طریق می‌باشد: فرار، اجتناب و تحمل خشکی. اجتناب و تحمل خشکی جزو مکانسیم مقاومت به خشکی به حساب می‌آینـد. عکس‌العمل گیاهان به خشکی بـه نـوع گیـاه، شـدت و مـدت تـنش خشکی بستگی دارد (Kooyers, 2015).

گیاهان از طریـق مکانیسـم‌هـای مختلـف کمبـود آب را تحمـل می‌کنند. این مکانیسم‌ها را می‌توان در سه دسته تقسیم‌بندی کرد: ۱- استراتژی‌های مورفولوژیکی همانند اجتنـاب بـرای مثـال ریشـه‌هـای عمیق‌تر ۲- استراتژی‌های فیزیولوژیکی مانند پایداری غشای سـلولی، افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی، تنظیم رشـد گیـاه، هـدایت روزنـه‌ای و تنظیم اسمزی و ۳- استراتژی‌های مولکولی مانند فعالیت پروتئین‌های شوک (Farooq *et al*., 2009). تجمع اسمولیت‌های سـازگار شـامل انواع اسید آمینه همچون پرولین و گلیسین بتائین و قنـدهای مختلـف همچون مانیتول، سوربیتول و تری هالوز است. این ترکیبات علاوه بر این‌که در شرایط کمبود آب با پایین نگهداشتن پتانسیل اسمزی سلول و کمک به جذب آب از محیط، نقش مهمی در ممانعت از تجزیه غشا و غیر فعال شدن آنزیم‌ها نیز ایفا مـی‌کننـد (Parida *et al*., 2008). مقاومت به خشکی که به منزله توانایی گیاه برای پایـداری در شـرایط محدودیت تامین آب است تقریباً در همه گیاهان دیده مـی‌شـود ولـی مقدار آن از گونه‌ای به گونه دیگر متفاوت اسـت (Kooyers, 2015). تحت تنش خشکی تجمع گونه‌های فعال اکسیژن افـزایش مـی‌یابـد. گیاهان از طریق سازوکارهای آنتی‌اکسـیدانی آنزیمـی و غیـر آنزیمـی میزان گونه‌های فعال اکسیژن را کـاهش مـی‌دهنـد (Miller *et al*., 2010). سیسـتم آنتـی‌اکسـیدانی شـامل ترکیبـات آنزیمـی همچـون سوپراکسید دیسـموتاز، پراکسـیداز، کاتـالاز، آسـکوربات پراکسـیداز و گلوتاتیون رداکتاز و ترکیبات دیگر غیر آنزیمـی اسـت. تحـت شـرایط تنش‌های محیطی محتویـات بـالای ترکیبـات آنتـی‌اکسـیدانی حـائز اهمیت می‌باشد (Farooq *et al*., 2009). همبستگی مثبـت و بسـیار بالایی بین تحمل به تنش‌های اکسیداتیو، که به‌عنـوان تـنش ثانویـه ناشی از تنش‌های محیطی مختلف محیطی ایجاد می‌گردد و افـزایش غلظت آنزیم‌هـای آنتـی‌اکسـیدان وجـود دارد. در ایـن زمینـه، نتـایج مطالعات نشان می‌دهد که در شرایط تنش شدید، غلظـت آنـزیم‌هـای آنتی‌اکسیدانی صددرصد افزایش یافته است (Farooq *et al*., 2009; Miller *et al*., 2010). افزایش محتوای پـرولین، گلیسـین بتـائین و کربوهیدرات کل تحت شرایط تنش کمبود آب در مطالعـات مختلفـی که روی گیاه کینوا انجام شده است گزارش شده است (Aziz *et al*., 2018; Naz *et al*., 2020).

کینوا به‌عنوان محصولی مستعد برای کشت در مناطق تحت تنش خشکی مورد توجه می‌باشد. گیاه کینوا سازگار به شرایط نامساعد خاک و اقلیم‌های مختلف است (Geerts *et al*., 2008). هزینه‌های پـایین کشت کینوا و قیمت به نسبت بالای آن از یک‌سو و نیاز به آب کـم و سازگاری با شرایط دشوار آب و هوایی از سوی دیگـر باعـث شـده تـا کشت کینوا به لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه باشد. با توجه به مشکل کمبود منابع آبی در مناطق مختلف کشور و نظـر بـه ایـن‌کـه مطالعات اندکی در زمینه کشت گیاه کینوا در کشورمان انجـام گرفتـه است از این رو هدف مطالعه حاضر بررسی تـاثیر رژیـم‌هـای مختلـف آبیاری بر برخی پارامترهای بیوشیمیایی و عملکـرد گیـاه کینـوا بـوده است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت کرت‌های خـرد شـده در قالـب طـرح پایـه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعـی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ و در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه کردستان واقـع در دشـت دهگـلان (۳۵ کیلومتری شرق سنندج) که ارتفاع آن از سطح دریا ۱۸۶۶ متر و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی است، اجرا شـد. قبـل از کاشـت بـه منظـور تعیـین خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک از قسمت‌های مختلف مزرعـه و از عمق ۶۰-۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری انجام شد (جدول ۱).

جدول ۱- نتایج تجزیه خاک محل اجرای آزمایش (عمق ۶۰-۰ سانتی‌متر)

Table 1- Soil analysis of experimental site (0-60 cm depth)

شن Sand (٪)	سیلت Silt (٪)	رس Clay (٪)	کربن آلی O.C (٪)	هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	اسیدیته pH	نیتروژن N (٪)	پتاسیم K (ppm)	فسفر P (ppm)
15.6	30	54.4	0.92	0.49	7.6	0.09	349.1	**8**

چهار دور مختلف آبیاری شامل چهار، هشت، ۱۲ و ۱۶ روز یکبـار به‌عنوان فاکتور اول و چهار سطح آبیاری شامل آبیاری کامـل (۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه)، ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ نیازآبی گیاه به‌عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شـد. آبیـاری اول (خـاک‌آب) و دو آبیـاری سـبک (جهـت جلوگیری از سله بستن خاک) برای کل مزرعه به‌صورت یکسان انجام شد و اعمال تیمارهای مختلف آبیاری پس از اطمینان از استقرار کامل بوته‌ها در مزرعه صورت گرفت. بـرای کشـت از رقـم Giza1 کـه از موسسه تحقیقات، اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه شـده بـود، اسـتفاده شد. برای آماده‌سازی زمین جهت کشـت، ابتـدا زمـین در بهـار ۱۳۹۸

به‌وسیله گاوآهن برگردان‌دار شخم زده شد و در ادامه برای خرد کردن کلوخه‌ها از دیسک استفاده شد. بر اساس نتایج آزمون خاک مقدار ۷۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل قبل از کاشت و میزان ۱۵۰ کیلوگرم اوره در طول فصل رشد (۵۰ کیلوگرم قبل از کاشت و ۱۰۰ کیلوگرم در زمان رشد رویشی (مرحله ۵ برگی) گیاه به‌صورت سرک) مصرف شد. علف‌های هرز مزرعه در طول فصل رشد به‌صورت دستی کنترل گردید و جهت مبارزه با آفت سنک کلزا که شیوع آن در منطقه رایج بود، یک مرحله مبارزه شیمیایی در اوایل تیر ماه توسط حشره‌کش ایمیداکلوپراید به میزان ۰/۶ در هزار صورت گرفت. ابعاد کرت‌های اصلی و فرعی به‌ترتیب ۵×۱۴/۵ متر و ۶×۲/۵ متر بود و هر کرت فرعی دارای شش خط کاشت به طول پنج متر و با فاصله ردیف ۵۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر بود. فاصله بین کرت‌های اصلی و بلوک‌ها دو متر و فاصله بین کرت‌های فرعی ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. عملیات کاشت به‌صورت دستی و به روش کپه‌ای در اوایل خردادماه و آبیاری به‌صورت قطره‌ای با نصب کنتور انجام شد. تبخیر و تعرق گیاه مرجع از روش پنمن-مونتیث پیشنهادی فائو و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (Carvalho *et al.*, 2013).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[890/(T+273)]U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)} \quad (۱)$$

که در آن ET_0: تبخیر تعرق گیاه مرجع ($mm.day^{-1}$)، Rn: تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJm^{-2}\ d^{-1}$)، T: میانگین دمای هوا (^oC)، U2: سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (ms^{-1})، e_a- e_d: کمبود فشار بخار در ارتفاع دو متری (KPa)، Δ: شیب منحنی فشار بخار ($KPa\ ^oC^{-1}$)، γ: ضریب رطوبتی ($KPa\ ^oC^{-1}$)، G: شار گرما به داخل خاک ($MJm^{-2}\ d^{-1}$) می‌باشد. در ادامه مقدار تبخیر و تعرق گیاهی یا نیاز آبی گیاه از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$ET_c = Kc \times ET_0 \quad (۲)$$

که در آن ETc و KC به‌ترتیب تبخیر و تعرق گیاهی و ضریب گیاهی می‌باشد. مقادیر KC گیاه کینوا در مراحل رشد باتوجه به منحنی طراحی شده توسط شریفان و همکاران (Talebnejad and Sepaskhah, 2015) محاسبه شد. در نهایت مقدار آب آبیاری از طریق روابط (۳) و (۴) محاسبه شد.

$$I = \frac{ET_c}{E_a} \quad (۳)$$

$$V = \frac{I}{1000} \times A \quad (۴)$$

که در آن I، Ea، A و V به‌ترتیب عمق آبیاری بر حسب میلی‌متر، راندمان آبیاری که معادل ۰/۹ در نظر گرفته شد، مساحت واحد آزمایشی برحسب متر مربع و حجم آب آبیاری بر حسب متر مکعب می‌باشد.

بعد از سبز شدن گیاهچه‌ها و در مرحله‌ی دو تا چهار برگی، عملیات تنک کردن جهت دستیابی به تراکم ۲۰ بوته در متر مربع انجام شد. نمونه‌برداری از واحدهای آزمایشی در زمان گلدهی گیاه و با در نظرگرفتن اثر حاشیه در هر کرت از بالاترین برگ‌های سبز کاملاً توسعه یافته انجام شد و نمونه‌ها با استفاده از تانک نیتروژن مایع به آزمایشگاه منتقل گردید. سپس نمونه‌های فریز شده تا زمان انجام آزمایش‌های بیوشیمیایی در یخچال فریزر ۴۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

به‌منظور اندازه‌گیری مقدار پرولین، از روش بیتز و همکاران (Bates *et al.*, 1973) استفاده گردید و محتوای پرولین برگ برحسب میکروگرم بر گرم وزن تر گزارش شد. میزان گلیسین بتائین به روش گریو و گراتان (Grieve and Grattan, 1983) اندازه‌گیری شد و مقدار آن برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن خشک گزارش شد. برای اندازه‌گیری کربوهیدرات‌های محلول و نامحلول برگ کینوا از روش آنترون (Yemen and Wills, 1954)، استفاده گردید و مقادیر برحسب ($mg.g^{-1}$ DW) گزارش شد. آنزیم پراکسیداز از نمونه‌های برگی تهیه شده در مرحله شروع گلدهی و به روش کلین و همدا (Kelin and Hemeda, 1990) و بافر فسفات اندازه‌گیری شد. میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز بر حسب میلی‌گرم در پروتئین در دقیقه تعیین شد.

کاتالاز: به منظور استخراج آنزیم مورد بررسی بافر استخراجی به روش تغییر یافته ناکانو و اسدا (Nakano and Asada, 1981) استفاده شد. فعالیت این آنزیم طبق روش برگمیر (Bergmeyer, 1970) اندازه‌گیری شد. میزان فعالیت آنزیم کاتالاز به‌صورت $\Delta A240\ min^{-1} mg\text{-}protein$ بیان شد. برای محاسبه عملکرد دانه، در اوایل شهریور ماه در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک پس از حذف ردیف‌های حاشیه، دو متر مربع از هر واحد آزمایشی برداشت شد و با توزین دانه‌های به‌دست آمده از هر کرت میزان عملکرد دانه در هکتار بر حسب کیلوگرم تعیین شد.

قبل از تجزیه واریانس داده‌ها آزمون نرمال بودن داده‌ها انجام شد و پس از اطمینان از توزیع نرمال آن‌ها، تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت. برای رسم شکل‌ها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

نتایج و بحث

محتوای پرولین برگ

نتایج نشان داد تاثیر دور آبیاری، سطوح آبیاری و برهمکنش آن‌ها روی محتوای پرولین برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). با افزایش شدت تنش خشکی محتوای پرولین برگ افزایش یافت. کمترین مقادیر پرولین برگ در تیمارهای آبیاری به

میزان ۱۰۰٪ و ۷۵٪ نیاز آبی گیاه به فواصل چهار روز مشاهده شد. بیشترین مقدار محتوای پرولین برگ نیز در تیمار آبیاری به میزان ۲۵٪ نیاز آبی گیاه و به فاصله ۱۶ روز یکبار و به میزان ۴۹۰/۹ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ مشاهده شد که به‌ترتیب ۳/۱۰ و ۳/۶۸ برابر محتوای پرولین در تیمارهای آبیاری به میزان ۱۰۰٪ و ۷۵٪ نیاز آبی گیاه و به فاصله ۴ روز یکبار بود (شکل ۱–A).

اسید آمینه پرولین به‌طور معمول در گیاهان در پاسخ به تنش‌های زیست‌محیطی به میزان بالا تجمع پیدا می‌کند (Ashraf and Foolad, 2007). پرولین علاوه بر این‌که به‌عنوان یک اسمولیت در تنظیم اسمزی نقش ایفا می‌کند در پایداری بخشیدن به زیرساختارهای سلولی (همانند غشاها و پروتئین‌ها) و ممانعت از دناتوره شدن ماکرومولکول‌ها، تنظیم pH سلولی، مهار رادیکال‌های آزاد و خنثی کردن پتانسیل اکسایش آن‌ها تحت شرایط تنش مشارکت می‌کند. پرولین هم‌چنین به‌عنوان منبع کربن نیتروژن برای گیاهان تحت تنش شدید عمل می‌کند و تحمل گیاه در برابر تنش را افزایش می‌دهد (Ashraf and Foolad, 2007; Lehmann *et al.*, 2010; Aranjuelo *et al.*, 2011). پرولین اسیدآمینه‌ای است که بخش عمده‌ای از پروتئین‌های درگیر در تنظیم اسمزی، دیواره سلول و غشا را تشکیل می‌دهد. پرولین در پاسخ به تنش خشکی در گیاهان و در سیتوسول تجمع پیدا می‌کند که نقش قابل توجهی در تنظیم اسمزی سیتوپلاسمی دارد (Ashraf and Foolad, 2007). هم‌چنین توزیع پرولین در درون و بیرون سلول نقش مهمی در مقاومت اسمزی بافت‌های مختلف نسبت به تنش خشکی ایفا می‌کند. اغلب در شرایط کمبود آب، سنتز پرولین از گلوتامیک اسید در سیتوسول و کلروپلاست سلول‌های گیاهی اتفاق می‌افتد، بنابراین پرولین در سیتوسول تجمع پیدا می‌کند تا توزیع آب به درون سلول انجام شود. در شرایط عادی پرولین به اندامک‌ها به‌ویژه واکوئل و پلازمید منتقل می‌گردد و درصورتی که گیاه تحت شرایط تنش خشکی قرار گیرد پرولین از واکوئل به سیتوسول انتقال می‌یابد (Lehmann *et al.*, 2010). بنابراین گیاهانی که با تنش خشکی مواجه می‌گردند مقدار قابل توجهی از منابع کربن و نیتروژن خود را صرف سنتز تنظیم‌کننده‌های اسمزی از قبیل پرولین می‌کنند تا قادر باشند فشار تورژسانس سلول‌های خود را حفظ نمایند (Aranjuelo *et al.*, 2011). مطالعات نشان داده است که تجمع پرولین در شرایط تنش، نقش حمایتی و حفاظتی اساسی از سلول‌ها و بافت‌ها را دارد و سبب تحمل و مقاومت به تنش‌های زیست‌محیطی می‌گردد (Ashraf and Foolad, 2007; Aranjuelo *et al.*, 2011). نتایج مطالعات مختلفی که روی روی گیاه کینوا انجام شده است، افزایش محتوای پرولین بر اثر تنش خشکی را نشان می‌دهد که با نتایج مطالعه حاضر مطابقت دارد (Gonzalez *et al.*, 2009; Elewa *et al.*, 2017; Miranda-Apodaca *et al.*, 2018).

جدول ۱ – جدول تجزیه واریانس مقادیر محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشاء سلولی و کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، کاروتنوئید و نسبت کاروتنوئید به کلروفیل کل تحت تأثیر دور آبیاری و نیاز آبی در گیاه کینوا

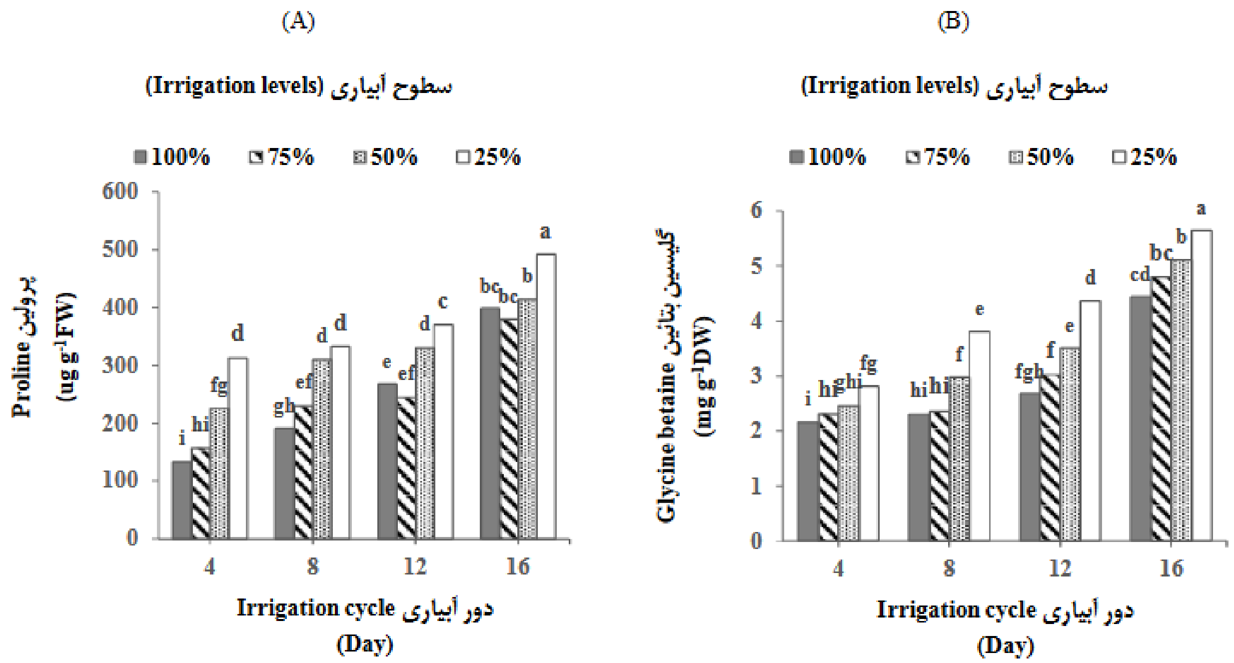
Table 1- Analysis of variance for proline, glycine betaine (GB), soluble carbohydrate (SC), insoluble carbohydrate (ISC) content, peroxidase (POX) and catalase (CAT) activity and yield affected by irrigation intervals and levels in quinoa.

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean square						
			پرولین Proline	گلیسین بتائین GB	کربوهیدرات محلول SC	کربوهیدرات نامحلول ISC	پراکسیداز POX	کاتالاز CAT	عملکرد دانه Grain yield
Block	تکرار	2	431.3^{ns}	0.03^{ns}	41.44^{ns}	11.58^{ns}	0.0015^{ns}	0.00003^{ns}	6031.9^{ns}
Irrigation cycle	دور آبیاری (C)	3	97783.6**	15.05**	876.22**	123.46**	0.2529**	0.00361**	1664527.4**
Error (a)	خطا (a)	6	584.6	0.07	11.08	4.93	0.0011	0.00014	24654.7
Irrigation levels	سطوح آبیاری (I)	3	44868.8**	3.69**	369.06**	200.03**	0.1296**	0.00674**	2825005.0**
I × C	I × C	9	1610.7**	0.14*	9.27^{ns}	3.34^{ns}	0.0069**	0.00047**	9418.8^{ns}
Error (b)	خطا (b)	24	479.8	0.05	17.46	10.92	0.0014	0.00013	19023.1
CV (%)	ضریب تغییرات	-	7.3	6.8	8.2	11.5	10.6	13.3	9.4

ns، * و ** به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪ است.

ns, * and ** : Not significant, significant at %5 and %1 probability levels, respectively.

نتایج مطالعات متعدد نشان می‌دهد، که این اسید آمینه به‌عنوان یک محافظ اسمزی باعث حفاظت از ساختمان چهارم پروتئین‌ها و ساختار غشای سلولی در مقابل تنش‌های محیطی مختلف از جمله تنش خشکی می‌گردد. گلیسین بتائین عمدتاً در کلروپلاست که در آن نقش حیاتی دارد، فراوان است و در تنظیم و حفاظت از غشای تیلاکوئیدی و در نهایت حفظ کارآیی فتوسنتزی، نقش دارد (Wang *et al.*, 2010b; Ashraf and Foolad, 2007). عزیز و همکاران Aziz *et al.* (2018) در مطالعه خود روی گیاه کینوا افزایش محتوای گلیسین بتائین بر اثر تنش خشکی را گزارش کردند.



شکل ۱- اثر متقابل دور آبیاری و سطوح آبیاری بر محتوای پرولین (A) و گلیسین بتائین (B) برگ گیاه کینوا. ستون‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Figure 1- Interaction of irrigation intervals and levels on the content of proline (A) and glycine betaine (B) of quinoa leaves Columns with common letters according to Duncan test are not significantly different at the 5% probability level.

محتوای گلیسن بتائین برگ

محتوای گلیسین بتائین برگ تحت تأثیر دور آبیاری و سطوح آبیاری در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت همچنین اثر متقابل دور آبیاری و سطوح آبیاری روی این صفت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). بیشترین محتوای گلیسین برگ در تیمار آبیاری به میزان ۲۵٪ نیاز آبی گیاه و به میزان ۵/۶۵ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک برگ مشاهده شد. افزایش فاصله آبیاری از چهار به ۱۶ روز در تیمار ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه باعث افزایش ۱۰۵ درصدی محتوای گلیسین بتائین برگ شد. همچنین در دور آبیاری چهار روز یکبار، آبیاری به میزان ۲۵٪ نیاز آبی گیاه باعث افزایش ۳۰/۲۵ درصدی محتوای گلیسین بتائین برگ نسبت به آبیاری به میزان ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه شد (شکل ۱ -B). گلیسین بتائین یک ترکیب آمونیومی چهارتایی است که به‌عنوان یک اسمولیت سازگار حاوی نیتروژن، در پاسخ به تنش‌های محیطی در بسیاری از گونه‌های گیاهی وجود دارد. در میان ترکیبات آمونیومی چهارتایی مختلف شناخته شده در گیاهان گلیسین بتائین به وفور در پاسخ به تنش‌های مختلف یافت می‌شود. گلیسین بتائین مولکولی دوقطبی می‌باشد که در pH فیزیولوژیک خنثی است (Wang *et al.*, 2010a).

کربوهیدرات‌های محلول و نامحلول

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد کربوهیدرات‌های محلول و نامحلول تحت تاثیر دور آبیاری و سطوح آبیاری در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت اما اثر متقابل این دو عامل روی مقادیر کربوهیدرات محلول و نامحلول معنی‌دار نشد (جدول ۱). افزایش فواصل آبیاری سبب شد میزان کربوهیدرات‌های محلول افزایش پیدا کند به گونه‌ای که افزایش دور آبیاری از چهار به ۱۶ روز مقادیر کربوهیدرات نامحلول و محلول را به‌ترتیب به میزان ۴۵/۱۶٪ و ۲۸/۶۱٪ افزایش داد. نتایج مقایسه میانگین هم‌چنین نشان داد که بین سطوح آبیاری از نظر کربوهیدرات محلول در الکل و آب تفاوت وجود داشت و کاهش میزان آب در دسترس گیاه سبب افزایش میزان کربوهیدرات نامحلول

و محلول شد. آبیاری به میزان ۲۵٪ نیاز آبی گیاه میزان کربوهیدرات نامحلول و محلول را به‌ترتیب به میزان ۲۶/۹۶٪ و ۳۸/۵۶٪ نسبت به آبیاری به میزان ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه افزایش داد (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر دور آبیاری و سطوح آبیاری بر مقادیر کربوهیدرات محلول و نامحلول و عملکرد گیاه کینوا

Table 2- Mean comparison effect of irrigation intervals and levels on soluble carbohydrate (SC), insoluble carbohydrate (ISC) and yield of quinoa

عامل آزمایشی Treatments	کربوهیدرات محلول SC (mg.g^{-1}DW)	کربوهیدرات نامحلول ISC (mg.g^{-1}DW)	عملکرد Yield (kg.ha^{-1})
دور آبیاری (روز) Irrigation cycle (Day)			
4	42.75^{d}	25.69^{c}	1790.7^{a}
8	46.12^{c}	27.03^{bc}	1729.0^{a}
12	53.22^{b}	29.16^{b}	1353.1^{b}
16	62.06^{a}	33.04^{a}	987.7^{c}
سطوح آبیاری Irrigation levels			
100%	45.66^{d}	23.91^{c}	1866.5^{a}
75%	47.61^{c}	27.03^{b}	1800.1^{a}
50%	52.90^{b}	30.85^{a}	1381.3^{b}
25%	57.97^{a}	33.13^{a}	812.53^{c}

در هر ستون و برای هر واحد آزمایشی، میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Within each column (between two horizontal lines), mean followed by a different letter are significantly different at 5% level (Duncan).

کربوهیدرات‌ها در تنظیم و تسهیل بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی همانند فتوسنتز، گلدهی و پیری اندام‌های مختلف گیاه هنگام مواجه با تنش خشکی در گیاهان مختلف حائز اهمیت هستند (Sami *et al.*, 2016). رشد نسبت به فتوسنتز حساسیت بیشتری نسبت به محدودیت آب دارد که نتیجه آن اغلب تجمع کربوهیدرات‌ها در گیاه در شرایط تنش کمبود آب می‌باشد. گیاه بخش عمده‌ای از کربنی که دریافت می‌کند را به شکل کربوهیدرات‌های محلول محلول و نامحلول ذخیره می‌کند. این ذخایر باعث می‌شوند تا قدرت رقابتی گیاه افزایش یابد و در مواقع ضروری و تنش خشکی نیاز مخزن‌ها به‌ویژه دانه‌ها را تأمین کند (Kleijn *et al.*, 2005). گیاه هنگامی که در معرض کمبود آب قرار می‌گیرد، حفظ پتانسیل اسمزی جهت ادامه رشد آن امری ضروری است و گیاه از طریق مکانیسم‌های تنظیم اسمزی ناشی از تجمع محلول‌های سازگار نظیر هیدرات‌های کربن محلول و نامحلول و سایر اسمولیت‌های سازگار، پتانسیل اسمزی جهت رشد خود را تأمین نماید. افزایش کربوهیدرات‌های محلول در گیاه عوامل مختلف از جمله گونه گیاهی، مدت زمان تنش، مرحله رشدی اعمال تنش و شدت تنش بستگی دارد (Parida *et al.*, 2008; Farooq *et al.*, 2009; Aranjuelo *et al.*, 2011). در شرایط تنش خشکی عامل هیدرواکسیل کربوهیدرات جایگزین آب غشاء و پروتئین‌ها می‌گردد تا از این طریق واکنش‌های آبدوستی پروتئین‌ها در طی پسابیدگی حفظ گردد و از طرفی کربوهیدرات‌ها با غشا و پروتئین‌ها پیوند هیدروژنی ایجاد می‌کنند تا از تغییر شکل آن‌ها جلوگیری شود. در شرایط خشکی، کربوهیدرات‌ها آب خود را از دست می‌دهند و در نتیجه ویسکوزیته آن‌ها در سیتوسول بالا رفته و این مساله باعث می‌شود تا حرکت مواد در درون سیتوسل کاهش یابد و به این وسیله از انتشار گونه‌های فعال اکسیژن جلوگیری می‌شود (Al-Saeedipour and Moradi, 2011; Gendy *et al.*, 2012). نتایج مطالعات متعدد افزایش تجمع کربوهیدرات‌ها در گیاه کینوا تحت شرایط تنش خشکی را نشان می‌دهد که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Gonzalez *et al.*, 2009; Bascunan-Godoy *et al.*, 2016; Gamez *et al.*, 2019).

پراکسیداز

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر دور آبیاری، سطوح آبیاری و برهمکنش آن‌ها روی میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). با افزایش فواصل آبیاری و کاهش میزان آبیاری فعالیت آنزیم پراکسیداز به‌طور چشمگیری افزایش یافت. بیشترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در تیمار آبیاری به میزان ۲۵٪ نیاز آبی گیاه و با دور آبیاری ۱۶ روز یکبار و به میزان ۰/۶۸۳ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه مشاهده

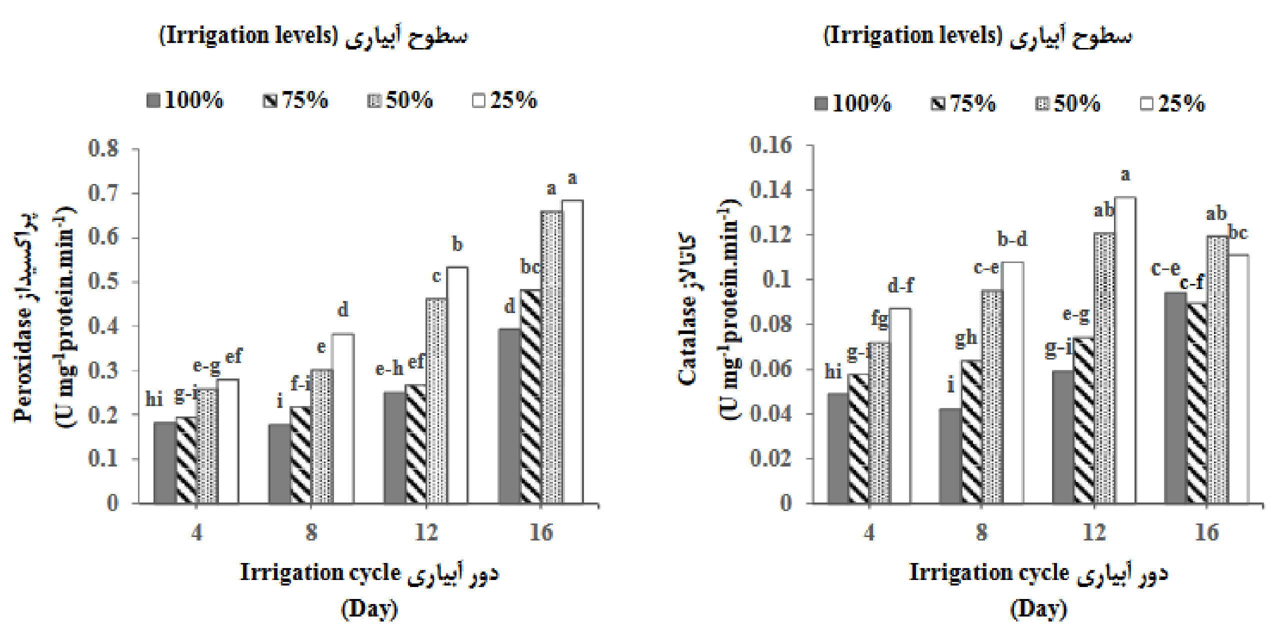
شد که با میزان فعالیت این آنزیم در تیمار آبیاری به میزان ۵۰٪ نیاز آبی گیاه و به فاصله ۱۶ روز یکبار آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۲-A).

در شرایط تنش خشکی نشت الکترون‌ها و انتقال آن‌ها به مولکول‌های اکسیژن و در نهایت تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن همانند سوپراکسید، هیدرواکسیل و هیدروژن پراکسید در گیاه افزایش می‌یابد. افزایش گونه‌های فعال اکسیژن منجر به خسارت‌های اکسیداتیوی از قبیل تخریب چربی‌ها، پروتیین‌ها و اسیدهای نوکلئیک در سلول شده و در نهایت در اثر تخریب DNA هسته سلول، باعث مرگ سلول می‌شود (Sarker and Oba, 2002; Aziz *et al.*, 2018). آنتی‌اکسیدانت‌ها مکانیسم دفاعی در برابر گونه‌های فعال اکسیژن هستند و اثرات مخرب تنش اکسیداتیو را کاهش می‌دهند. گیاهان در مقابل انواع رادیکال‌های آزاد اکسیژن با ایجاد فعالیت آنتی‌اکسیدانتی معین مانند پراکسیداز، کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز این گونه‌های فعال اکسیژن را پاکسازی می‌کنند. پراکسیداز در بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه شامل پاسخ به تنش‌های زیستی و غیر زیستی مشارکت دارد (Sarker and Oba, 2002). نتایج مطالعه‌ای که روی گندم انجام شده است نشان داد که فعال شدن سیستم دفاعی آنزیمی از قبیل آنزیم‌های پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز در گندم تحت شرایط تنش خشکی نقشی اساسی در افزایش تحمل به تنش خشکی داشته است (Ardalani *et al.*, 2014). عزیز و همکاران (Aziz *et al.* 2018) نیز در مطالعه خود روی گیاه کینوا افزایش فعالیت پراکسیداز را در شرایط تنش خشکی گزارش کردند. در مطالعه دیگری که روی گیاه کینوا انجام گرفت افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در گیاهانی که به‌صورت دیم کشت شده بودند نسبت به گیاهان تحت آبیاری کامل گزارش شد (Faghir *et al.*, 2013).

کاتالاز

نتایج نشان داد فعالیت آنزیم کاتالاز تحت تاثیر دور آبیاری، سطوح آبیاری و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۱). فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار دور آبیاری چهار روز یکبار با کاهش میزان آب در دسترس افزایش یافت به گونه‌ای که در تیمار آبیاری به میزان ۲۵٪ نیاز آبی گیاه میزان فعالیت این آنزیم ۷۸/۲۴٪ بیشتر از آبیاری به طور کامل بود.

(A) (B)



شکل ۲- اثر متقابل دور آبیاری و سطوح آبیاری بر فعالیت آنزیم پراکسیداز (A) و آنزیم کاتالاز (B) برگ گیاه کینوا
ستون‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.
Figure 2- Interaction of irrigation intervals and levels on the peroxidase (A) and catalase activity (B) of quinoa leaves
Columns with common letters according to Duncan test are not significantly different at the 5% probability level.

بالاترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار آبیاری به میزان ۲۵٪ و به فاصله ۱۲ روز یکبار به میزان ۰/۱۳۷ واحد آنزیمی در

میلی‌گرم پروتئین در دقیقه مشاهده شد که با آبیاری به میزان ۵۰٪ به فاصله ۱۲ و ۱۶ روز و آبیاری تفاوت معنی‌داری نشان نداد. افزایش فاصله زمانی آبیاری از چهار به ۱۶ روز در تیمار آبیاری کامل باعث افزایش ۹۲/۸۰ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز شد (شکل ۲-B).

تنش کمبود آب باعث ایجاد پاسخ‌های پیچیده سلولی و فیزیولوژیکی در گیاهان می‌گردد. در شرایط تنش خشکی به‌طور معمول فتوسنتز کاهش می‌یابد. همچنین کمبود آب از طریق بسته ماند روزنه‌ها و نقصان متابولیکی و تغییر در تنفس میتوکندریایی و زنجیره انتقال الکترون باعث تولید گونه‌های فعال اکسیژن و در نهایت آسیب به DNA و پروتئین‌ها می‌گردد و تاثیر جدی روی متابولیسم سلولی می‌گذارد (Ford *et al.*, 2011). در شرایط کمبود آب در دسترس گیاه به دلیل محدود شدن جذب و تثبیت CO_2 و فعالیت اکسیژنازی آنزیم روبیسکو، تنفس نوری افزایش می‌یابد که این مساله در نهایت منجر به افزایش تولید H_2O_2 می‌گردد (Fghir *et al.*, 2013). کاتالاز یکی از مهم‌ترین آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی است که در شرایط تنش خشکی فعالیت آن افزایش می‌یابد. کاتالاز مهم‌ترین پاک‌کننده H_2O_2 در پراکسی‌زوم می‌باشد و H_2O_2 را به آب و اکسیژن مولکولی تبدیل می‌کند (Fghir *et al.*, 2013). نتایج مطالعه بررسی میزان فعالیت آنزیم‌های اکسیدانت در شرایط تنش خشکی در گیاه کینوا نشان دادند که میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهانی که تحت شرایط تنش خشکی (دیم) رشد کردند طی دوسال متوالی به میزان ۱۰۳٪ و ۸۷٪ در مقایسه با گیاهانی که آبیاری کامل انجام گرفت افزایش یافت (Fghir *et al.*, 2013). حبیبی و همکاران Habibi *et al.* (2013) افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش خشکی در گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) را گزارش کرد.

عملکرد دانه

نتایج نشان داد عملکرد دانه تحت تاثیر دور آبیاری و سطوح آبیاری در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت اما بر همکنش این عوامل روی عملکرد اثرگذار نبود (جدول ۱). با افزایش شدت تنش خشکی عملکرد دانه کاهش یافت. افزایش فاصله آبیاری از چهار به هشت روز تاثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه نداشت، اما افزایش فاصله زمانی بین آبیاری به ۱۲ و ۱۶ روز باعث افت عملکرد دانه شد و گیاهان که هر ۱۶ روز یکبار آبیاری شده بودند پایین‌ترین میزان عملکرد دانه را به خود اختصاص دادند. فواصل آبیاری ۱۲ و ۱۶ روز یکبار در مقایسه با دور آبیاری چهار روز یکبار به‌ترتیب به میزان ۲۴/۴۴٪ و ۴۴/۸۴٪ عملکرد کمتری داشتند (جدول ۲). گیاهانی که به‌طور کامل (۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه) آبیاری شدند بیشترین عملکرد دانه را به خود اختصاص دادند هرچند با گیاهانی که به میزان ۷۵٪ نیاز آبی آبیاری شده بودند در یک گروه آماری قرار گرفتند. آبیاری گیاه به میزان ۵۰٪ و ۲۵٪ نیاز آبی گیاه باعث افت عملکرد دانه گیاه شد و به‌ترتیب عملکرد دانه را ۳۰٪ و ۵۶/۴۷٪ کاهش داد (جدول ۲). علی‌رغم وجود مکانیسم‌های متعدد مقاومت به تنش خشکی در کینوا، نتایج مطالعات نشان می‌دهد تنش کمبود آب باعث افت عملکرد در این گیاه می‌گردد (Geerts *et al.*, 2008) با این حال نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که کینوا حتی در تنش‌های بسیار شدید خشکی نیز قادر به تولید عملکرد می‌باشد. تاثیر تنش خشکی روی نقصان عملکرد در گیاه احتمالاً نسبت به سایر عوامل زیست‌محیطی بیشتر است و این امر به این دلیل است که شدت تنش و طول دوره تنش خشکی بسیار حیاتی می‌باشد. تنش خشکی باعث کاهش اندازه برگ، گسترش ساقه و تکثیر ریشه، ایجاد اختلال در روابط آبی گیاهان و کاهش کارآیی مصرف آب می‌شود (Farooq *et al.*, 2009; Daryanto *et al.*, 2017). گیاهان انواع واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را در سطح سلولی و مولکولی نسبت به تنش خشکی نشان می‌دهند، بنابراین تنش خشکی و پاسخ گیاهان به آن یک پدیده پیچیده می‌باشد. تحت تاثیر تنش خشکی جذب CO_2 توسط برگ‌ها و تثبیت آن، عمدتاً به‌واسطه بسته شدن روزنه‌ها، آسیب غشایی و اختلال در فعالیت آنزیم‌های مختلف، به‌ویژه آنزیم‌های درگیر در فرآیند تثبیت CO_2 و سنتز آدنوزین تری فسفات؛ کاهش می‌یابد. تنش خشکی از طریق فعال کردن تنفس نوری و افزایش گونه‌های فعال اکسیژن به ماکرومولکول‌های موجد در گیاه آسیب می‌رساند، آسیب ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن یکی از بازدارنده‌های رشد در گیاهان است (Farooq *et al.*, 2009; Nakabayashi *et al.*, 2014). کمبود آب یک محدودیت شدید محیطی برای بهره‌وری گیاهان است. انتقال آسیمیلات‌ها به سمت مخازن تولیدمثل امری بسیار حیاتی جهت توسعه دانه می‌باشد. تولید و پر شدن دانه می‌تواند به واسطه آسیمیلات در دسترس و بهره‌گیری از آن از طریق منابع و مخازن محدود گردد. در شرایط تنش خشکی گیاه میزان تخصیص مواد فتوسنتزی به ریشه را به منظور جذ آب بیشتر افزایش می‌دهد (Farooq *et al.*, 2009). تنش خشکی می‌تواند باعث کاهش عملکرد گیاهان به‌طور قابل توجهی گردد. کاهش ۸۱-۷۹ درصدی عملکرد ذرت و ۴۰ درصدی عملکرد گندم دوروم در مطالعات گزارش شده است (Farooq *et al.*, 2009; Daryanto *et al.*, 2017). در واقع تنش کمبود آب با کاهش محتوای رطوبت نسبی، پایداری غشاء سلولی و میزان کلروفیل در نهایت میزان عملکرد در واحد سطح را کاهش داد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با افزایش شدت تنش میزان پرولین و گلیسین بتائین به‌طور چشمگیری افزایش یافت به گونه‌ای که آبیاری گیاهان به میزان ۲۵٪ و به فاصله ۱۶ روز یکبار

میزان این اسمولیت‌ها را نسبت به آبیاری به‌طور کامل و چهار روز یکبار به‌ترتیب به میزان ۲۶۸٪ و ۱۶۰٪ افزایش داد. بیشترین محتوای کربوهیدرات‌های محلول و نامحلول به‌ترتیب به میزان ۶۲/۰۶، ۳۳/۰۴ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک برگ در گیاهانی مشاهده شد که هر ۱۶ روز یکبار آبیاری شدند. میزان آنزیم‌های کاتالاز و پر اکسیداز نیز در کل و با افزایش فاصله زمانی بین آبیاری و کاهش میزان آب در دسترس افزایش یافت. بیشترین عملکرد دانه در گیاهانی که هر چهار روز یکبار آبیاری شده بودند و به میزان ۱۷۹۰/۷ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد که با گیاهانی آبیاری شده با فاصله زمانی هشت روز یکبار در یک گروه آماری قرار گرفتند. آبیاری گیاهان به میزان ۲۵٪ نیاز آبی آن‌ها باعث شد عملکرد دانه در مقایسه با شرایط شاهد فقط ۵۶/۴۷٪ کاهش یابد. به‌طور کلی نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که کینوا حتی در تنش‌های شدید خشکی نیز قادر به تولید عملکرد می‌باشد که یکی از دلایل آن بروز مکانیسم‌های کاهش شدت تنش به‌وسیله گیاه کینوا همانند افزایش محتویات اسمولیت‌های سازگار و افزایش فعالیت‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی با افزایش طول دوره آبیاری و عدم فراهمی نیاز آبی گیاه به‌صورت کامل می‌باشد.

References

1. Aranjuelo, I., Molero, G., Erice, G., Christophe Avice, J., and Nogues, S. 2011. Plant physiology and proteomics reveals the leaf response to drought in alfalfa (*Medicago sativa* L.). The Journal of Experimental Botany 62: 111-123.
2. Ardalani, Sh., Saeidi, M., Jalali-Honarmand, S., Ghobadi, M. E., and Abdoli, M. 2014. The physiological responses and antioxidant enzyme activity in bread wheat genotypes under post anthesis drought tension. Crop Physiology Journal 6 (4): 45-59. (in Persian with English abstract).
3. Ashraf, M. F. M. R., and Foolad, M. R. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. Environmental and Experimental Botany 59 (2): 206-216.
4. Aziz, A., Akram, N. A., and Ashraf, M. 2018. Influence of natural and synthetic vitamin C (ascorbic acid) on primary and secondary metabolites and associated metabolism in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants under water deficit regimes. Plant Physiology and Biochemistry 123: 192-203.
5. Bascunan-Godoy, L., Reguera, M., Abdel-Tawab, Y. M., and Blumwald, E. 2016. Water deficit stress-induced changes in carbon and nitrogen partitioning in *Chenopodium quinoa* Willd. Planta 243 (3): 591-603.
6. Bates, L. S., Waldren, R. P., and Tear, I. B. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil 39: 205-207.
7. Bergmeyer, N. 1970, "Method of enzymatic analyse", Academia Verlag Berlin 1: 636-647.
8. Carvalho, L. G. D., Evangelista, A. W. P., Oliveira, K. M. G., Silva, B. M., Alves, M. D. C., Júnior, S., Miranda, W. L. 2013. FAO Penman-Monteith equation for reference evapotranspiration from missing data.
9. Daryanto, S., Wang, L., and Jacinthe, P. A. 2017. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. Agricultural Water Management 179: 18-33.
10. Elewa, T. A., Sadak, M. S., and Dawood, M. G. 2017. Improving drought tolerance of quinoa plant by foliar treatment of trehalose. Agricultural Engineering International: CIGR Journal 19 (Special Issue): 245-254.
11. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. B. S. M. A., and Basra, S. M. A. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In Sustainable agriculture (pp. 153-188). Springer, Dordrecht.
12. Fghire, R., Ali, O. I., Anaya, F., Benlhabib, O., Jacobsen, S. E., and Wahbi, S. 2013. Protective antioxidant enzyme activities are affected by drought in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). Journal of Biology, Agriculture and Healthcare 3 (4): 62-68.
13. Ford, K. L., Cassin, A., and Bacic, A. F. 2011. Quantitative proteomic analysis of wheat cultivars with differing drought stress tolerance. Frontiers in Plant Science 2: 1-11.
14. Gamez, A. L., Soba, D., Zamarreño, Á. M., García-Mina, J. M., Aranjuelo, I., and Morales, F. 2019. Effect of water stress during grain filling on yield, quality and physiological traits of Illpa and Rainbow quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. Plants 8 (6): 1-15.
15. Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Vacher, J., Mamani, R., Mendoza, J., and Taboada, C. 2008. Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). European Journal of Agronomy 28 (3): 427-436.
16. Gendy, A. S. H., Said, Ali. Ahl, H. A. H., and Mahmoud, A. A. 2012. Growth, productivity and chemical constituents of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) plants as influenced by cattle manure and biofertilizers treatments. Australian Journal of Basic and Applied Sciences 6 (5): 1-12.
17. Gonzalez, J. A., Gallardo, M., Hilal, M., Rosa, M., and Prado, F. E. 2009. Physiological responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to drought and waterlogging stresses: dry matter partitioning. Botanical Studies 50 (1): 35-42.
18. Grieve, C. M., and S. R. Grattan. 1983. Rapid assay for determination of water soluble quaternary ammonium compounds. Plant Soil 70: 303-307.

19. Habibi, G. 2013. Effect of drought stress and selenium spraying on photosynthesis and antioxidant activity of spring barley. Acta Agriculturae Slovenica 101 (1): 31-39.
20. Hemeda, H. M., and Kelin, B. P. 1990. Effects of naturally occurring antioxidants on peroxidase activity of vegetables extracts. Journal of Food Science 55: 184-185.
21. Jongrungklang, N., Toomsan, B., Vorasoot, N., Jogloy, S., Boote, K. J., Hoogenboom, G., and Patanothai, A. 2013. Drought tolerance mechanisms for yield responses to pre-flowering drought stress of peanut genotypes with different drought tolerant levels. Field Crops Research 144: 34-42.
22. Kleijn, D., Treier, U. A., and Müller-Schärer, H. 2005. The importance of nitrogen and carbohydrate accumulation for plant growth of the alpine herb *Veratrum album*. New Phytologist 166: 565-575.
23. Kooyers, N. J. 2015. The evolution of drought escape and avoidance in natural herbaceous populations. Plant Science 234: 155-162.
24. Lehmann, S., Funck, D., Szabados, L., and Rentsch, D. 2010. Proline metabolism and transport in plant development. Amino Acids 39: 949-962.
25. Miller, G. A. D., Suzuki, N., Ciftci-Yilmaz, S. U. L. T. A. N., and Mittler, R. O. N. 2010. Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. Plant, Cell and Environment 33 (4): 453-467.
26. Miranda-Apodaca, J., Yoldi-Achalandabaso, A., Aguirresarobe, A., Del-Canto, A., and Pérez-López, U. 2018. Similarities and differences between the responses to osmotic and ionic stress in quinoa from a water use perspective. Agricultural Water Management 203: 344-352.
27. Nakabayashi, R., Yonekura-Sakakibara, K., Urano, K., Suzuki, M., Yamada, Y., Nishizawa, T., and Michael, A. J. 2014. Enhancement of oxidative and drought tolerance in Arabidopsis by overaccumulation of antioxidant flavonoids. The Plant Journal 77 (3): 367-379.
28. Nakano, Y., and Asada. K. 1981. Hydrogen proxide is scavenged by ascorbate-spesific proxidase in spinach chloroplasts. Plant Cell Physiology 22: 867-880.
29. Naz, H., Akram, N. A., and Kong, H. 2020. Assessment of secondary metabolism involvement in water stress tolerance of quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd.) subjected to varying water regimes. Pakistan Journal of Botany 52 (5): 1553-1559.
30. Parida, A. K., Dagaonkar, V. S., Phalak, M. S., and Aurangabadkar, L. P. 2008. Differential responses of the enzymes involved in proline biosynthesis and degradation in drought tolerant and sensitive cotton genotypes during drought stress and recovery. Acta Physiologiae Plantarum 30 (5): 619-627.
31. Repo-Carrasco, R., Espinoza, C., and Jacobsen, S. E. 2003. Nutritional value and use of the Andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). Food Reviews International 19 (1-2): 179-189.
32. Sadiq, M., Akram, N. A., Ashraf, M., and Ali, S. 2017. Tocopherol confers water stress tolerance: sugar and osmoprotectant metabolism in mung bean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek]. Agrochimica 61 (1): 28-42.
33. Saeedipour, S., and Moradi, F. 2011. Effect of drought at the post-anthesis stage on remobilization of carbon reserves and some physiological changes in the fla leaf of two wheat cultivars differing in drought resistance. Journal of Agricultural Science 33: 81-92.
34. Sami, F., Yousuf, M., Faizan, M., Faraz, A., and Hayat, S. 2016. Role of sugars under abiotic stress. Plant Physiology and Biochemistry 109: 57-61.
35. Sarker, U., and Oba, S. 2018. Catalase, superoxide dismutase and ascorbate-glutathione cycle enzymes confer drought tolerance of Amaranthus tricolor. Scientific Reports 8 (1): 1-12.
36. Sinha, S., and Saxena, R. 2006. Effect of iron on lipid peroxidation, and enzymatic and non-enzymatic antioxidants and bacoside-A content in medicinal plant *Bacopa monnieri* L. Chemosphere 62 (8): 1340-1350.
37. Song, Q., Liu, C., Bachir, D. G., Chen, L., and Hu, Y. G. 2017. Drought resistance of new synthetic hexaploid wheat accessions evaluated by multiple traits and antioxidant enzyme activity. Field Crops Research 210: 91-103.
38. Talebnejad, R., and Sepaskhah, A. R. 2015. Effect of different saline groundwater depths and irrigation water salinities on yield and water use of quinoa in lysimeter. Agricultural Water Management 148: 177-188.
39. Wang, G. P., Zhang, X. Y., Li, F., Luo, Y., and Wang, W. 2010a. Over accumulation of glycine betaine enhances tolerance to drought and heat stress in wheat leaves in the protection of photosynthesis. Photosynthetica 48 (1): 117-126.
40. Wang, L. J., Fan, L., Loescher, W., Duan, W., Liu, G. J., Cheng, J. S., and Li, S. H. 2010b. Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under heat stress and accelerates recovery in grapevine leaves Mbmc. Plant Biology 10 (1): 34.
41. Yemen, E. W., and Willis, A. J. 1954. Estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. Journal of Biochemistry 57: 508-514.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 19, No. 3, Fall. 2021, p. 275-285

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۹، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، ص. ۲۸۵-۲۷۵

Evaluation of the Effect of Different Irrigation Regimes on the Accumulation of Some Compatible Osmolytes and the Activity of Antioxidant Enzymes in Quinoa

L. Moradi[1], E. Roohi[2], F. Hosseinpanahi[3*], A. Siosemardeh[4]

Received: 20-01-2021
Accepted: 05-07-2021

Introduction

The high nutritional value of quinoa and its ability to grow under adverse environmental conditions have led to an increase in the area under cultivation globally. Quinoa has attracted particular attention in recent years due to its ability to grow under adverse environmental conditions and its high nutritional value. Water scarcity stress is one of the non-bioenvironmental stresses that has destructive effects on crops' development and yield. Morphological, physiological, and biochemical reactions of plants to water deficiency depend on several factors, including stress intensity, duration of stress, and plant growth stage. Increased proline content, glycine betaine, total carbohydrates, and decreased yield under water stress conditions have been reported in various quinoa studies. The low cost of growing quinoa and its relatively high price, on the one hand, and the need for low water and adaptation to difficult climatic conditions, on the other hand, have made quinoa cultivation very economical. Due to the lack of water resources in different parts of the country and the fact that few studies have been done on quinoa cultivation in our country, the present study was conducted to investigate the effect of different irrigation regimes on some biochemical parameters and quinoa yield.

Materials and Methods

An experiment was conducted to investigate the effect of irrigation intervals and amounts on the quinoa's physiological traits and yield at the University of Kurdistan research farm, located in Dehgolan plain. The experiment was arranged in a split-plot scheme based on randomized complete blocks design with three replications. Four irrigation intervals (4, 8, 12, and 16 days) were considered the main factor, and four irrigation levels (100%, 75%, 50%, and 25% of plant water requirement) were considered secondary factors. Giza1 cultivar, which was obtained from the Seed and Plant Improvement Institute, was used for cultivation. Traits such as the content of proline, glycine betaine, soluble carbohydrates, insoluble carbohydrates, catalase activity, peroxidase activity, and grain yield were studied. Data analysis of variance was performed using SAS 9.1 statistical software, and means were compared using the Duncan test at 5% probability level. Excel software was also used to draw the graphs.

Results and Discussion

The effect of irrigation intervals and levels were significant on all studied traits. The study results showed that by reducing the plant's available water and increasing the irrigation intervals, the amount of proline, glycine betaine, soluble carbohydrates, insoluble carbohydrates, peroxidase activity, and catalase activity were increased, but the grain yield was decreased. Increasing the irrigation intervals from 4 to 8 days did not significantly affect grain yield, but increasing the interval to 12 and 16 days reduced grain yield by 24.4 and 44.8%, respectively. The highest grain yield was observed at full irrigation treatment (1866.5 $kg.ha^{-1}$) but there was no significant difference with the treatment of 75% of the plant water requirement. The rate of yield reduction in the treatment of 25% of plant water requirement compared to the control was about 56.5%.

Conclusions

The results showed that quinoa produced acceptable levels of yield even under severe drought stress, i.e., when the irrigation interval increases or the water availability decreases. Based on our results, one reason for this is stress reduction mechanisms by the quinoa plant, such as increasing the content of compatible osmolites and increasing antioxidant enzymes' activity.

Keywords: Catalase, Drought stress, Glycine betaine, Peroxidase, Proline

1- PhD candidate in Crop Physiology, Department of Plant Production and genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan
2- Crop and Horticultural Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran
3- Assistant professor in Crop Physiology, Department of Plant Production and genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan
4- Associate professor in Crop Physiology, Department of Plant Production and genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan
(*- Corresponding Author Email: f.hosseinpanahi@uok.ac.ir)